

文章编号: 1000-8055(2002) 02-0268-05

弧齿锥齿轮的齿距误差对传动性能的影响研究

邓效忠¹, 方宗德², 任东锋², 魏冰阳²
(1. 洛阳工学院 机电工程系, 河南 洛阳 471039;
2. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 采用齿轮啮合仿真和承载啮合仿真技术, 对重合度达到 2.0 的航空弧齿锥齿轮的齿距误差的影响进行了研究。首先定义了航空弧齿锥齿轮相对齿距误差, 选取了量级, 研究了这一误差对齿轮实际重合度、传动误差、齿面载荷分布和齿间载荷分配的影响。进一步又分析了在一定齿距误差下载荷变化的影响以及固定载荷下误差变化的影响, 为高重合度航空弧齿锥齿轮的应用提供了依据。

关键词: 弧齿锥齿轮; 重合度; 齿距误差

中图分类号: TH132.41

文献标识码: A

Study on Contact Ratio of Spiral Bevel Gears and Influence of Pitch Error

DENG Xiao-zhong¹, FANG Zong-de², REN Dong-feng², WEI Bing-yang²
(1. Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471039, China;
2. Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Applying TCA (Tooth Contact Analysis) and LTCA (Loaded Tooth Contact Analysis) techniques, the influence of pitch error on the meshing behavior of aviation spiral bevel gears with contact ratio 2.0 was studied. First, the relative pitch error was defined and its amount was selected according to the accuracy degree of aviation gears, then the influence of this error on the real contact ratio, transmission error, load distribution on tooth surfaces and load share between teeth was analyzed numerically. Further, the effects of load changes under certain pitch error and pitch error changes under certain load were analyzed to provide conditions for application of aviation spiral bevel gears with high contact ratio.

Key words: spiral bevel gears; contact ratio; pitch error

1 引言

提高齿轮传动的重合度, 有利于改善齿轮传动的平稳性和齿间载荷分配, 以提高齿轮动态性能和强度, 这一结论已在平行轴齿轮传动中得到

充分验证, 并为齿轮界人士所共识。而在传统的弧齿锥齿轮设计与制造中, 大都要求齿面接触路径 (即齿面瞬时接触点轨迹) 近似垂直于根锥^[1], 此时其啮合性能近似于直齿圆柱齿轮, 重合度较低, 振动、噪音大。因此, 提高弧齿锥齿轮重合度以改

收稿日期: 2001- 09- 29; 修订日期: 2001- 12- 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50175090); 航空科学基金资助项目 (96C53037)

作者简介: 邓效忠 (1957-), 男, 河南洛阳人, 洛阳工学院教授, 西北工业大学在职博生。

进其啮合性能, 自然引起了各国研究人员的兴趣^[2~4]。

作者应用基于局部综合法的加工参数设计技术、齿轮啮合仿真和承载啮合仿真技术, 通过倾斜齿面接触路径, 延长接触路径长度的方法, 设计了重合度达 2.0 的弧齿锥齿轮传动^[5], 进一步又设计了重合度 3.0 的弧齿锥齿轮, 并分析研究了其啮合性能, 理论上证明了该类齿轮具有优良的动态性能和强度特性。

对于平行轴齿轮传动, 往往通过增加齿高来提高重合度^[6], 此时产生的主要问题是基节误差影响了实际重合度和齿间载荷分配, 而齿高增大又可能使齿根应力增加, 采取的补偿办法是提高精度等级以控制基节误差, 但制造成本无疑是增加了。

对于弧齿锥齿轮, 在重合度提高后也同样面临上述问题, 而且弧齿锥齿轮的几何特性要比平行轴齿轮复杂得多。研究齿距误差对啮合性能的影响是相当困难而又必须的。本文应用啮合仿真和承载啮合仿真技术对具有齿距误差的高重合度弧齿锥齿轮进行了较为精确和全面的研究, 为该类齿轮的应用进一步提供了依据。

2 包括齿距误差的齿轮传动误差

本文的分析研究以一对航空弧齿锥齿轮为例, 分析方法采用啮合仿真 TCA (Tooth Contact Analysis) 和承载啮合仿真 LTCA (Loaded Tooth Contact Analysis) 技术^[5]。

通过 TCA 分析得到的这对弧齿锥齿轮在无误差无载荷理想状态下的传动误差示于图 1(a) 中, 图中给出了相邻 3 对啮合齿的传动误差。该图反映了这对齿轮的以下特点:

- (1) 弧齿锥齿轮具有准共轭特性, 对于两条曲线纵向重叠的部分, 只有上部曲线代表齿对啮合, 下部曲线与上部曲线的间距, 代表相邻可能啮合齿对的齿间距。
- (2) 在无载时齿轮的实际重合度是 1.0, 即只有一对齿参与啮合^[7]。
- (3) 在载荷作用下, 当前齿对的变形补偿了相邻可能啮合齿对的齿间距时, 第二对齿开始啮合, 图中传动误差曲线反映了该对齿轮的最大可能设计重合度是 2.0。
- (4) 当重合度达到 2.0 后载荷继续增加, 齿轮出现边缘接触, 此时重合度略可增大, 但振动将加剧, 噪声和异响明显增加。

航空弧齿锥齿轮的齿距容许误差一般为 0.01 mm 左右。影响啮合的因素为法向相对齿距误差, 定义为:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \tag{1}$$

式中: t 为齿距, 下标 1 和 2 指小轮和大轮。考虑较严重的情况本文算例取平均 $\Delta t = \pm 0.008$ mm, 正号表示滞后退出啮合, 负号表示提前进入啮合。

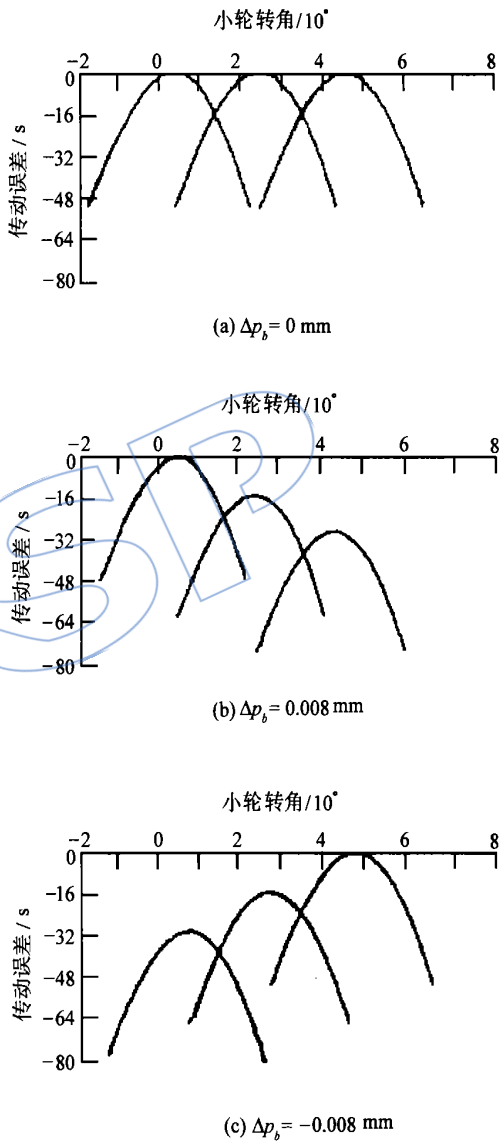


图 1 不同基节误差时的传动误差曲线
Fig. 1 Transmission error curves under different pitch error

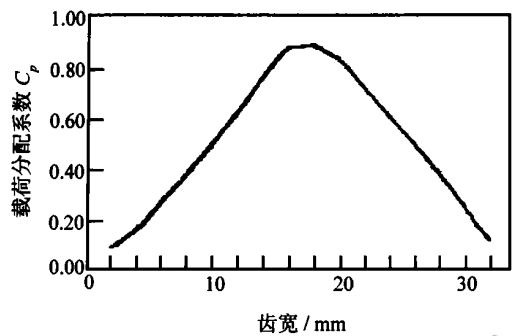
图 1(b) 和 (c) 分别显示了在上述相对齿距误差下这对齿轮的传动误差。若指定中间 1 条曲线代表当前啮合齿, 则齿距误差引起传动误差曲线位置下移 (或上移, 视齿距误差的正、负号), 当前啮合齿将滞后 (提前) 进入啮合和滞后 (提前) 退出啮合, 与前面的分析是一致的。

3 有齿距误差时的承载接触分析

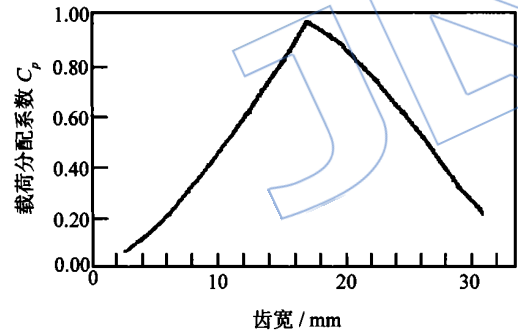
作者应用有限元柔度系数法和数学规划技术开发了齿轮承载接触分析软件模块^[8], 同样适用于存在齿距误差时的弧齿锥齿轮 LTCA, 唯一需要考虑的不同之处是齿距误差和齿轮准共轭特性共同引起初始齿间间距, 而该间距在图 1 中是用大轮转角 $\Delta\varphi$ 表示的, 它与齿轮法向相对齿距误差 Δt 的关系可表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta t}{R} \tag{2}$$

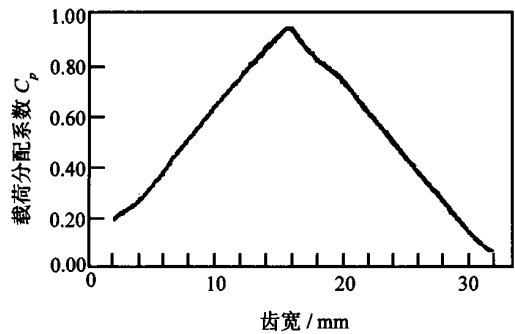
式中, R 为齿面当前瞬时接触点上的法向量相对于大轮轴线的径矢, 可表示为:



(a) $\Delta p_b = 0 \text{ mm}$



(b) $\Delta p_b = 0.008 \text{ mm}$



(c) $\Delta p_b = -0.008 \text{ mm}$

图 2 不同基节误差时的载荷分配

Fig. 2 Load distributions under different pitch error

$$R = (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot \vec{k}$$

式中: $\vec{r}$ 和 $\vec{n}$ 分别为瞬时接触点的位置向量和单位法向量, $\vec{k}$ 为大轮轴线单位向量, 都可由 TCA 程序中获得。由式(2)得到的径矢 R 可直接代入 LTCA 程序进行承载啮合仿真。

4 有齿距误差时的齿面载荷分布与齿间载荷分配

图 2 所示是当计算载荷为 $1500 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时在不同齿距误差下的随齿轮啮合过程变化的齿间载荷分配系数, 由上述 LTCA 获得并定义为:

$$C_p = \frac{p}{P} \tag{3}$$

式中: p 为当前啮合齿上的瞬时承载, P 为传递扭矩转换的总载荷, 即同时啮合各对齿上的载荷之和。由式(3)知, 当 $C_p = 1$ 时代表当前啮合齿对单独承载, 当 $C_p = 0$ 时该齿对不参与啮合。

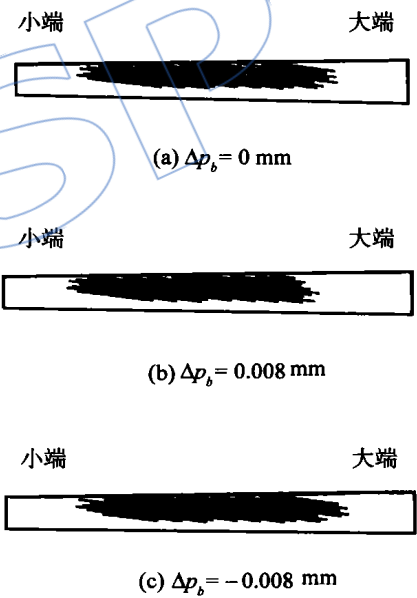


图 3 不同基节误差时的齿面印痕

Fig. 3 Loaded contact patterns under different pitch error

图 3 所示是同样载荷下的齿面印痕。对照图 2 和图 3 可以看到, 无齿距误差时齿面印痕在齿中部, 载荷过程比较对称, 最大载荷在中间, 无单齿对啮合出现, 实际重合度确实达到 2.0 以上。而当有齿距误差时, 最大载荷略有增大, 且分别向啮出端或啮入端偏移, 但重合度仍在 2.0 以上, 印痕位置则分别向小端和小轮顶部或大端和大轮顶部偏移, 在小轮或大轮顶部出现部分边缘接触。总之, 在上述误差容量和载荷条件下, 啮合性能的改变

变不大,不致于严重影响齿轮的正常使用。

5 在齿距误差下载荷的影响

图 4 和图 5 所示是当存在相对齿距误差 $\Delta t = 0.008\text{ mm}$ 时,在负荷力矩分别为 800, 1500, 3000 $\text{N} \cdot \text{m}$ 时的载荷分配过程和齿面印痕。由图可见,当载荷减小时,载荷分配系数出现 1.0 的值,即出现单对齿啮合,实际重合度降到 2.0 以下;载荷增大时,载荷分配系数减小,说明轮齿变形补偿了齿面的准共轭特性和齿距误差,齿间载荷分配趋于均匀,但载荷向啮出端偏移,在小轮顶部产生逐渐增大的边缘接触。齿面印痕的位置基本不变(此处没有考虑支撑变形),印痕宽度随载

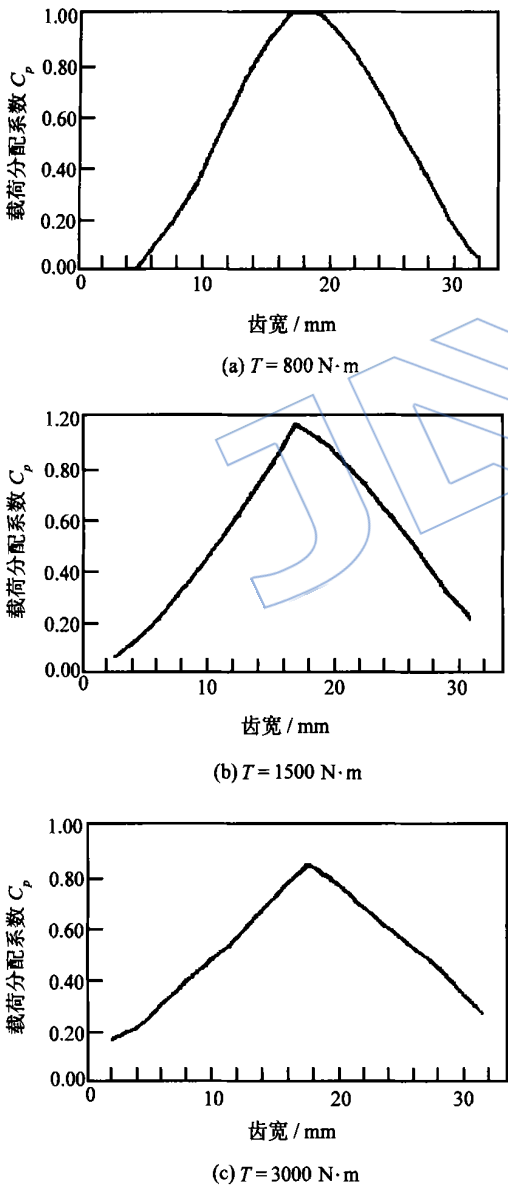


图 4 载荷对载荷分配的影响

Fig. 4 Load distributions under different load

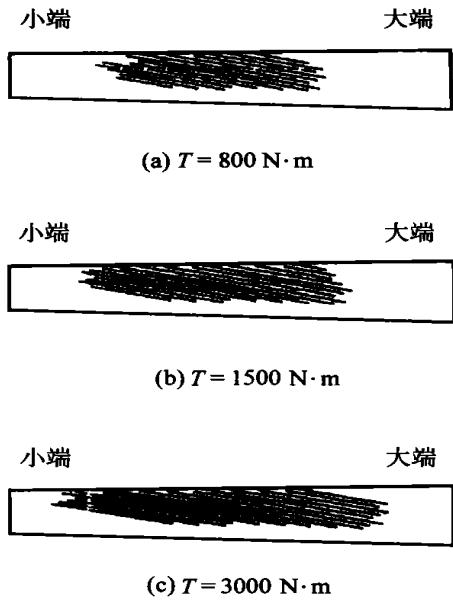


图 5 载荷对齿面印痕的影响

Fig. 5 Loaded contact patterns under different load
荷增大。

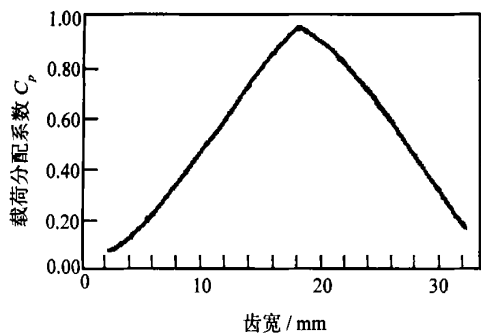
6 齿距误差量的影响

图 6 和图 7 所示是在负荷力矩 1500 $\text{N} \cdot \text{m}$ 作用下,相对齿距误差分别为 0.004, 0.008, 0.016 mm 时的载荷分配过程和齿面接触印痕。对照图 6 和图 7 可以看到,随着齿距误差增大,出现了单对齿啮合情况,实际重合度下降到 2.0 以下。印痕向小端和小轮齿顶偏移情况加剧,在小轮齿顶出现了比较严重的边缘接触,此时齿轮的振动噪音和强度都将产生明显影响,这样的问题不容许在航空齿轮使用中出现。

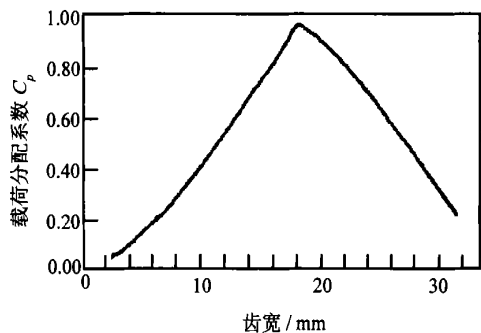
7 结 论

本文采用 TCA 和 LTCA 技术,针对相对齿距误差对高重合度弧齿锥齿轮啮合性能的影响,以及相对齿距误差条件下载荷和误差量对齿轮性能的影响,进行了较为全面和深入的数值分析研究,主要结论为:

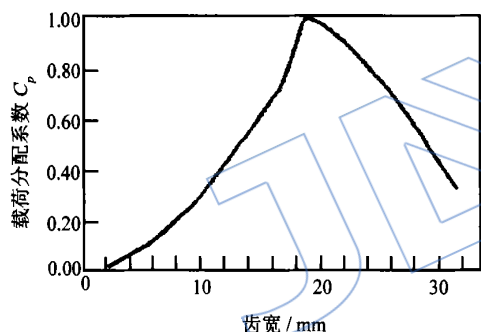
- (1) 按本文对相对齿距误差的定义,正或负的相对齿距误差,将使齿轮滞后退出或提前进入啮合。最大载荷向啮出或啮入方向移动,在小轮或大轮顶部有部分边缘接触。
- (2) 载荷增大产生的变形补偿了齿距误差,使齿距误差的影响减弱;而载荷减小则使齿距误差的影响增大。
- (3) 相对齿距误差量的增大将降低齿轮重合



(a) $\Delta p_b = 0.004 \text{ mm}$



(b) $\Delta p_b = 0.008 \text{ mm}$



(c) $\Delta p_b = 0.016 \text{ mm}$

图 6 基节误差对载荷分配的影响

Fig. 6 Loaded distributions under different pitch error
度,使齿面印痕偏移和边缘接触加剧。

(4) 按精度等级要求合格的航空弧齿锥齿轮产品,控制在容许范围内的齿距误差将不会严重影响重合度达到 2.0 的齿轮的性能。

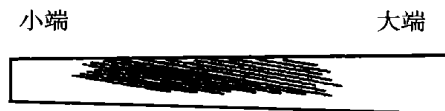
高重合度弧齿锥齿轮是一种正在开发的高性能齿轮,它的推广应用尚需进一步研究和试验、实践的验证。



(a) $\Delta p_b = 0.004 \text{ mm}$



(b) $\Delta p_b = 0.008 \text{ mm}$



(c) $\Delta p_b = 0.016 \text{ mm}$

图 7 基节误差对齿面印痕的影响

Fig. 7 Loaded contact patterns under different pitch error

参考文献:

- [1] Kahraman A, Blankenship G W. Effect of Involute Contact Ratio on Spur Gear Dynamics[J]. ASME J. of Mechanical Design, 1999, 121(1): 112- 118.
- [2] Falah B, Gosselin C and Cloutier L. Experimental and Numerical Investigation of Themeshing Cycle and Contact Ratio in Spiral Bevel Gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(1/2): 21- 38.
- [3] 邓效忠,杨宏斌,牛噪. 高齿弧齿锥齿轮的设计和性能试验[J]. 中国机械工程, 1999, 10(8): 864- 866.
- [4] 杨宏斌,范明,周彦伟. 高齿准双曲面齿轮的研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(8): 897- 900.
- [5] 方宗德,杨宏斌,周彦伟,等. 高速弧齿锥齿轮动态啮合质量优化[J]. 航空学报, 2001, 22(1): 69- 72.
- [6] Elkholy A H. Tooth Load Sharing in High Contact Ratio Spur Gears[J]. ASME J. of Mech., Trans., and Auto- in Design, 1985, 107(2).
- [7] 邓效忠,范明,杨宏斌. 螺旋锥齿轮的重合度与承载量的关系[J]. 中国机械工程, 2001, 12(8): 878- 880.
- [8] 方宗德. 齿轮轮齿承载接触分析(LTCA)的模型和方法[J]. 机械传动, 1988, 22(2): 1- 3.

(责任编辑 吴一黄)